Vol.13, No.4, Winter 2024, pp.314-343 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI: 10.22067/geoeh.2023.82181.1358 Open access

Spatial-Temporal behavior of the reactivation of the paleolandslide in Hossein abad Village, Kalpush, Northeast of Iran

Mahdieh Ghayoor Bolorfroshan[a], Seyed Reza Hosseinzadeh[b*], Gholam Reza Lashkaripour[c], Masoud Minaei[d], Hakimeh Morabbi Heravi[e]

[a] *PhD in Geomorphology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran*
[b] *Professor in Geomorpholoy, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran*
[c] *Professor in Geology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran*
[d] *Associate Professor in GIScience, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran*
[e] *Associate Professor Statistics, University of Bojnord, Bojnord, Iran*

Received: 28 April 2024 ***Revised: 3 July 2024*** ***Accepted: 20 July 2024***

Extended Abstract

Introduction

Landslides are natural hazards in mountainous regions that cause significant damage to man-made structures, such as buildings, roads, and power transmission lines. Complex geological, geomorphological, and climatic conditions lead to slope failures, where paleo landslides, formed during the Quaternary period, stabilize over time. These historical landslides often reactivate due to triggers such as earthquakes, heavy rainfall, river erosion, changes in reservoir water levels (RWL), road construction, and deforestation. Additionally, anthropogenic factors, such as construction within the landslide mass or agricultural activities on the crown of the landslide, can further destabilize these areas. The threat to human life and infrastructure is especially high when cities and villages are located on or near old landslides. Examples of this can be seen in the Vajont Dam disaster in Italy and the Three Gorges Dam in China.

In Iran, especially in the Alborz and Zagros mountain ranges, numerous ancient landslides exist that reactivate under the influence of earthquakes, heavy rainfall, and human activities. Assessing the vulnerability of buildings to such phenomena is critical. Various

* .Corresponding author: Seyed Reza Hosseinzadeh Email: srhosszadeh@um.ac.ir Tel:+989153117325

How to cite this Article: Ghayoor Bolorfroshan, M. , Hosseinzadeh, S. . R. , Lashkaripour, G. R. , Minaei, M. , & Morabbi Heravi, H. (2024). Spatial-temporal behaviour of old landslide reactivation (case study: Hossein-Abad Kalpoosh Village landslide). *Journal of Geography and Environmental Hazards, 13(4),314-343*

methods, including InSAR radar interferometry and Permanent Scatterer Interferometry (PSI), are employed to monitor slow-moving landslides and evaluate their impact on structures. This study, integrating geomorphological data, landslide kinematics, and building vulnerability assessment, focuses on the reactivation of the Hossein Abad landslide in northern Iran and analyzes its spatial-temporal behavior.

Material and Methods

Hossein Abad village, located in the Kalpush district of Miyami County in Semnan Province**,** is the largest village in the region. Situated on moderate slopes and atop four old landslide terrains with an average slope of 14%, the village has expanded over time. This study was conducted in four stages, involving the collection, production, processing, and interpretation of historical, field, and radar remote sensing data.

Initially, a landslide geomorphological map of the active old landslides in Hossein Abad was produced using aerial photos, geological maps**,** and UAV images**.** Then, the radar interferometry technique was applied to analyze the kinematics of the landslide movement, with displacement rate maps generated from Sentinel-1A/B radar data. Subsequently, the vulnerability of buildings in the village was assessed through field visits and questionnaires, and a vulnerability map was produced using the classification method proposed by Palmisano et al., 2016. Damage to buildings was classified based on various indicators such as material type, structural characteristics, and crack patterns**.** The study also analyzed the spatial relationship between landslide movement and building vulnerability, focusing on the geomorphological context of the landslides.

Results and Discussion

In the village of Hossein Abad, four old landslides were identified, and over time, the development of the village and construction activities mainly expanded on the southern slope, directly over two large, old landslides. In 2013, the Hossein Abad earthen dam was constructed near these landslides, with a capacity of approximately 16 million cubic meters of water**.** Heavy snowfall and rainfall in late 2018 activated these landslides, causing significant damage, including the collapse of more than 160 buildings. The main landslide, covering 22 hectares, exhibited rotational and compound movement over a marl-limestone bedrock**.**

The reactivation of the old landslide was confirmed through spatial analysis using permanent scatterers between 2018 and 2020. Significant horizontal and vertical displacements were observed, especially near the landslide toe and areas with visible groundwater flow. These deformations were largely driven by groundwater fluctuations influenced by the nearby dam reservoir.

In the vulnerability assessment of buildings, 67 structures were evaluated in the region. Approximately 60% of these buildings were constructed with traditional brick masonry and were located in landslide-prone areas. Many of these buildings suffered heavy damage due to ground movements and structural changes. The greatest damage occurred at the landslide toe, where upraising and settlement of the ground were most significant. The study indicates that modern concrete buildings at the toe of the landslide experienced less damage compared to older, masonry structures. Additionally, the results suggest that

using lighter materials and locating buildings away from the center of landslides can mitigate damage. The investigation further emphasizes the effectiveness of integrating ground displacement monitoring with building vulnerability assessment.

Conclusion
This study utilizes Permanent Scatterer InSAR data and building damage analysis across different zones of the Hossein Abad landslide to investigate its spatial behavior. The results show that the vulnerability of buildings in landslide-prone areas can be assessed based on the type of landslide kinematics, building resistance**,** and the geomorphological features of the affected area. The study indicates that the Hossein Abad landslide reactivates with each occurrence of heavy rainfall or changes in groundwater levels, causing significant damage to buildings. Even after reconstruction, similar damage is likely to occur, highlighting the ongoing instability of the region.

Keywords: Paleo Landslide, Building Vulnerability Assessment, Permanent Scatterer Interferometry (PSI) , InSAR Images, Ground Displacement Monitoring, Antropogenic Landslide.

How to cite this Article: Ghayoor Bolorfroshan, M. , Hosseinzadeh, S. . R. , Lashkaripour, G. R. , Minaei, M. , & Morabbi Heravi, H. (2024). Spatial-temporal behaviour of old landslide reactivation (case study: Hossein-Abad Kalpoosh Village landslide). *Journal of Geography and Environmental Hazards, 13(4),314-343*

ISSN (Online):2383-3076 ISSN (Print):2322-1682

جلد ۱۳، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۳، ص ۳۴۳-۳۱۴

نشریه علمی

جغرافیا و مخاطرات محیطی

مقاله پژوهشی DOI:10.22067/geoeh.2023.82181.1358 دسترسی آزاد

رفتارشناسی فضایی – زمانی فعالیت مجدد زمین‌لغزش قدیمی روستای حسین‌آباد کالپوش

مهدیه غیور بلورفروشان– دانش‌آموخته دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران.

سیدرضا حسین زاده[1] – استاد ژئومورفولوژی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران.

غلامرضا لشکری پور- استاد زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

مسعود مینائی- دانشیار علوم اطلاعات جغرافیایی (GIScience)، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

حکیمه مربی هروی- استادیار آمار، دانشگاه بجنورد، ایران

تاریخ **دریافت:۱۴۰۳/۲/۹** **تاریخ بازنگری:۱۴۰۳/۴/۱۳** **تاریخ پذیرش:۱۴۰۳/۴/۳۰**

چکیده

لغزش‌های قدیمی یکی از عوامل شکست دامنه‌ها و وقوع لغزش‌های جدید در جهان هستند که با فعالیت مجدد خود، تهدید بزرگی را برای زندگی بشر، زیرساخت‌ها و سازه‌های مسکونی در مناطق شهری و روستایی به وجود می‌آورند. در این پژوهش، فعالیت لغزش قدیمی روستای حسین‌آباد در شمال استان سمنان، با استفاده از تصاویر سنتینل ۱ و تکنیک تداخل سنجی راداری PSI در بازه زمانی ۲۰۱۸–۲۰۲۰ ارزیابی شد. سپس با استفاده از مشاهدات میدانی، ارزیابی آسیب‌پذیری ساختمان‌ها (BVA) و ارتباط مکانی آسیب آن‌ها با ژئومورفولوژی لغزش، رفتار فضایی– زمانی فعالیت لغزش قدیمی، مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج تکنیک PSI نشان می‌دهد میانگین نرخ جابه‌جایی به ترتیب در مدار صعودی و نزولی ۱۹–۱۲– و ۱۶–۲۲– میلی‌متر در سال است. این لغزش در تابستان حرکت خود را آغاز نموده و در دوره پربارش باران با ۳۵– میلی‌متر بیشترین نشست را در بدنه اصلی و پای لغزش تجربه کرده است. مشاهدات الگوی ترک و ارزیابی آسیب‌پذیری ساختمان‌ها نیز نتایج تداخل سنجی راداری را تأیید می‌نماید. بیش از ۷۰ درصد ساختمان‌ها به دلیل بالاآمدگی و نشست خاک در بدنه اصلی و پای لغزش تخریب شده‌اند. همچنین در پنجه لغزش و مرزهای جانبی خسارت کمتری به ساختمان‌ها وارد شده است.

[1] . نویسنده مسئول: ۰۹۱۵۳۱۱۷۳۲۵ Email: srhosszadeh@um.ac.ir

این امر نشان از افزایش تغییرات در داخل توده اصلی لغزش قدیمی و حرکت مجدد آن به‌صورت لغزش چرخشی در دوره پربارش سال ۲۰۱۹ دارد.

کلیدواژه‌ها: زمین‌لغزش قدیمی، ارزیابی آسیب‌پذیری ساختمان، تداخل‌سنجی پراکندگی دائمی (PSI)، پایش جابجایی زمین، تصاویر InSAR ، زمین‌لغزش آنتروپوژنیک.

۱- مقدمه

زمین‌لغزش یکی از مخاطرات طبیعی در مناطق کوهستانی است که هرساله در بسیاری از کشورهای جهان، خسارت زیادی را به سازه‌های دست‌ساز انسان مانند ساختمان‌ها، جاده‌ها، خطوط انتقال نیرو و ... وارد می-نماید. محیط‌های پیچیده زمین‌شناسی، ژئومورفولوژیکی و تغییرات آب و هوایی، سبب شکست دامنه‌ها شده است و زمین‌لغزش‌های قدیمی[1] در طی کواترنر تشکیل و درنهایت پایدار شده‌اند (Guo et al., 2020). این لغزش‌های تاریخی معمولاً با حضور محرک‌هایی مانند زلزله، بارندگی شدید و سنگین فصلی، فرسایش رودخانه‌ای، تغییرات تراز آب مخازن، جاده‌سازی، راه‌آهن، گسترش شهرها و جنگل‌زدایی ناپایدار شده و برای چندمین بار فعال خواهند شد(Zhang et al., 2021; Tian et al., 2022). همچنین این لغزش‌ها می‌توانند در اثر عوامل آنتروپوژن مانند ساخت‌وساز در بدنه توده لغزشی و فعالیت کشاورزی در تاج لغزش و یا باربرداری از پای توده آن دوباره فعال گردند. درصورتی‌که شهر و مناطق روستایی، تأسیسات مهندسی و دریاچه سدها بر روی لغزش‌های قدیمی و یا در مجاورت آن‌ها قرار گیرد در درازمدت، زندگی و فعالیت‌های انسانی به خطر خواهد افتاد. لغزش‌های سد وایونت[2] ایتالیا با بیش از ۲۰۰۰ نفر تلفات انسانی (Wolter, Stead, Ward, Clague & Ghirotti, 2016; Dykes & Bromhead, 2018)، مجموعه لغزش‌های بزرگ‌ترین پروژه انرژی آبی در جهان واقع در منطقه سه دره چین[3] (Tang, Wasowski & Juang, 2019; Jian, Wang & Yin, 2009) نمونه‌ای از فعالیت مجدد زمین‌لغزش‌های قدیمی در جهان هستند که براثر بارش، تغییرات تراز آب مخازن سدها و ساختمان‌سازی، فعال شده و خسارات انسانی و مالی بسیاری را به ساختمان‌ها و

[1] Old Landslide
[2] Vaiont
[3] Three Gorges Reservoir

تأسیسات زیربنایی وارد نموده‌اند. در رشته‌کوه‌های البرز و زاگرس ایران نیز لغزش‌های قدیمی زیادی وجود دارد که معمولاً با سه عامل محرک زلزله، بارندگی شدید و مداوم و فعالیت‌های انسانی، حرکت دوباره خود را آغاز نموده‌اند (Rezapour, Jabari & Bahrami, 2022). همچنین دامنه‌های شرقی البرز، دارای بیشترین پتانسیل لغزشی در کشور می‌باشند و وجود لغزش‌های قدیمی در منطقه گواه براین ادعاست.

با توجه به اهمیت آسیب‌پذیری سازه‌های انسانی در برابر مخاطرات طبیعی، مطالعه آن‌ها در جهان در حال گسترش است (Palmisano, Vitone & Cotecchia, 2016) و آسیب‌پذیری سازه‌ها یک موضوع چالش‌برانگیز و اساسی در ارزیابی خطر زمین‌لغزش است (Van Westen, Van Asch & Soeters, 2006). اصطلاح ارزیابی آسیب‌پذیری ساختمان‌ها (BVA)[1] توسط دانشمندان به روش‌های مختلفی مطرح می‌گردد. از دیدگاه علوم طبیعی و مهندسی، آسیب‌پذیری به‌عنوان درجه خسارت، برحسب درصد آسیب سازه، به یک عنصر یا مجموعه‌ای از عناصر معین که در معرض یک رویداد لغزشی قرار دارند تعریف می‌شود (Glade, 2003). ارزیابی عملکرد سازه ساختمان به معنای ارزیابی مقدار آسیب، نقش کلیدی در پیشگیری و کاهش خطر دارد. درواقع تجزیه‌وتحلیل مکانی- زمانی تغییر شکل زمین و میزان آسیب ساختمان ابزار مفیدی برای درک تکامل زمین‌لغزش است. رویکردهای مختلفی برای بررسی عملکرد ساختمان تحت تأثیر پدیده‌های ناپایداری زمین در ادبیات علمی شرح داده شده است. بااین‌حال هر رویکرد مخصوص منطقه ویژه‌ای بوده و تفاوت‌هایی را در نتایج نهایی مربوطه نشان می‌دهد؛ بنابراین در دسترس بودن یک طبقه‌بندی استاندارد برای ارزیابی آسیب ساختمان‌ها و تحلیل علل خرابی آن‌ها حائز اهمیت است.

بورلند و همکاران (Burland, Broms & De Mello, 1978) ، با استفاده از مطالعات پیشین، طبقه‌بندی آسیب برای فونداسیون ساختمان را بر اساس خسارات وارده بر دیوارها پیشنهاد کرده و ۶ نوع آسیب را از درجه ۰- ۵ (بدون خسارت تا فروپاشی کامل) طبقه‌بندی نمودند. پس از آن‌ها الکساندر (Alexander, 1986) مقیاس شدت را برای آسیب سازه‌ای که از فرونشست و لغزش به وجود آمده‌اند را پیشنهاد داد. او شرایط ساختمان‌ها را با پرسشنامه‌های بازرسی آسیب ساختمان پس از زلزله تطابق داد و تکمیل نمود. در طی زمان، طبقه-

[1] Building Vulnerability Assessment (BVA)

بندی آسیب ساختمان به‌وسیله لئون و همکاران (Leone, Asté & Leroi, 1996) کامل‌تر شد و درجه خسارت بین ۰ و ۱ تعیین گردید. در سال ۱۹۹۸ این روش با استفاده از مقیاس ماکروسیسمیک اروپا EMS[1] توسط گرونتال (Grünthal, 1998) به‌روزرسانی شد و با هدف ارزیابی آسیب ساختمان‌های واقع بر لغزش در مقیاس شهری معرفی شد. پاپاتوما–کول (Papathoma-Köhle, Neuhäuser, Ratzinger, Wenzel & Dominey-Howes, 2007)، مطالعه‌ای را درباره ارتباط آسیب‌پذیری فیزیکی ساختمان‌ها با زمین‌لغزش انجام داده و ۵ شاخص فاصله، شیب، میزان خطر، مصالح و تعداد طبقات ساختمان را بررسی نمودند. در مطالعات بعدی محققانی همچون اوزلی و همکاران (Uzielli, Nadim, Lacasse & Kaynia, 2008)، لی و همکاران (Li, Nadim, Huang, Uzielli & Lacasse, 2010)، کپس و همکاران (Kappes, Papathoma-Kohle & Keiler, 2012)، گودفری و همکاران (Godfrey, Ciurean, Van Westen, Kingma & Glade, 2015)، پالمیسانو و همکاران (Palmisano et al., 2016) و سینق و همکاران (Singh, Kanungo & Pal, 2019)، شاخص‌های آسیب‌پذیری را کامل نمودند و ویژگی‌های معماری ساختمان (تعداد طبقات، شکل ساختمان، زیرزمین و ...)، مشخصات مصالح (جنس پی، اسکلت، سقف و ...) و ویژگی‌های ساختاری سازه (ستون، دیوار، ترک عمودی، مایل با زاویه ۴۵ درجه، افقی و ...) را در لیست شاخص‌های سنجش آسیب‌پذیری ساختمان‌ها افزودند.

تجربه نشان داده است کهترکیبی از نتایج بررسی آسیب‌پذیری ساختمان‌ها با داده‌های تغییر شکل زمین، می‌تواند درک بهتری از رفتار زمین‌لغزش را ارائه دهد. امروزه تغییر شکل‌های آهسته زمین را، می‌توان با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری (InSAR) در طیف وسیعی از شرایط آب و هوایی و ژئومورفیک پایش نمود (Nishiguchi, Tsuchiya & Imaizumi, 2017). همچنین با استفاده از روش InSAR می‌توان لغزش‌های قدیمی فعال ناشناخته را شناسایی نمود و مرز دقیق پهنه‌های فعالیت آن‌ها را مشخص و میزان حرکت آن‌ها را ارزیابی نمود (Kiseleva et al., 2014). علاوه براین با استفاده از تکنیک تداخل سنجی پراکنشگر دائمی[2] PSIمی‌توان حرکات آهسته تغییر شکل زمین به میلی‌متر در سال را برای مناطق شهری و روستایی استخراج

[1] European Macroseismic Scale (EMS)
[2] Persistent Scatterer Interferometry

نمود و درک بهتری از هندسه و سینماتیک لغزش را فراهم نمود (Aslan et al., 2020). در این زمینه، لو و همکاران (Lu, Catani, Tofani & Casagli, 2014)، سیامپالینی و همکاران (Ciampalini et al., 2014)، نوتتی و همکاران (Notti et al., 2015)، ماتئوس و همکاران (Mateos et al., 2017)، اینفانته و همکاران (Infante et al., 2019) و فرلیسی و همکاران (Ferlisi, Gullà, Nicodemo & Peduto, 2019) برای بررسی ارتباط بین آسیب‌پذیری ساختمان‌ها و سرعت حرکت زمین‌لغزش از روش‌های تداخل سنجی راداری و سری زمانی PSI در مناطق مسکونی استفاده نمودند. محققان ایرانی، در مطالعه رفتار زمین‌لغزش‌ها بیشتر بر تکنیک‌های سنجش‌ازدور راداری تمرکز داشته‌اند (Shirani, 2018; Afshari, Ghahroudi Tali, Sadough & Ehteshami Moin abadi, 2020; Khodaei Geshlag, Roostaei, Mokhtari & Valizadeh Kamran, 2021) و مطالعات محدودی برای نقش آسیب ساختمان‌ها در ارزیابی فعالیت لغزش انجام داده‌اند.

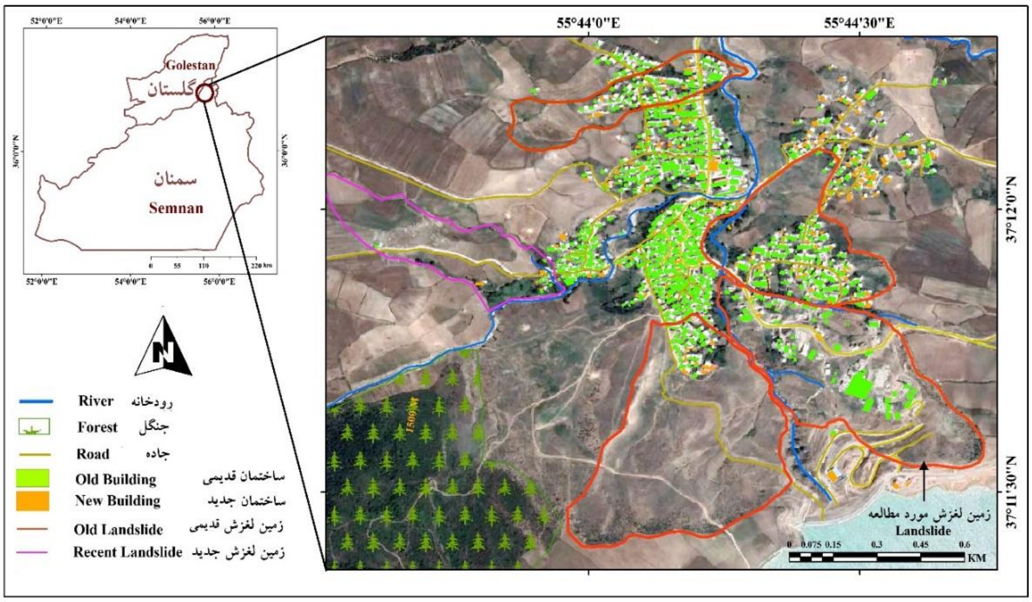
در دامنه‌های شمالی البرز در منطقه کالپوش نیز زمین‌لغزش‌های قدیمی وسیعی در دامنه‌ها گسترده شده‌اند که در گذر زمان و تغییر کاربری، مورفولوژی آن‌ها به‌آسانی قابل‌تشخیص نمی‌باشند. در دهه اخیر روستای حسین‌آباد در منطقه کالپوش بر روی ۴ زمین‌لغزش قدیمی گسترش‌یافته و سد خاکی حسین‌آباد نیز در مجاورت آن آبگیری شده است. پس از بارش شدید اسفندماه ۱۳۹۷ این زمین‌لغزش‌ها ناپایدار شده و به ۱۶۰ ساختمان خسارت شدیدی وارد نموده است. میزان آسیب‌پذیری ساختمان‌های روستای حسین‌آباد به دلیل آبگیری سد بالادست، بارش سنگین، رشد تصاعدی جمعیت، نبود آئین‌نامه‌های ساخت‌وساز و عدم شناخت پهنه لغزشی قدیمی و فعالیت مجدد آن، در طی زمان زیاد شده و فاجعه آفریده است. لذا این پژوهش با تلفیق داده‌های ژئومورفولوژی لغزش، سینماتیک حرکت لغزش با استفاده از داده‌های تکنیک تداخل سنجی پراکنشگر دائمی PSI و میزان آسیب‌پذیری ساختمان‌ها بر اساس روش پالمیسانو و همکاران (Palmisano et al., 2016)، به مطالعه فعالیت مجدد لغزش حسین‌آباد پرداخته و رفتار فضایی– زمانی آن را مورد ارزیابی قرار می‌دهد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه موردمطالعه

روستای حسین‌آباد در بخش کالپوش شهرستان میامی در شمال استان سمنان قرار گرفته است و بر اساس سرشماری مرکز آمار ایران در سال ۱۳۹۵ با ۳۵۱۴ نفر بزرگ‌ترین روستای منطقه می‌باشد. این روستا با وسعت ۶۰ هکتار، از شمال و غرب با جنگل‌ها و ارتفاعات گالیکش، از سمت شرق و شمال شرق با دشت شاد و در جنوب با دریاچه سد و دشت کالپوش محدود می‌شود. بافت قدیمی روستا در مرکز و در مجاورت سرشاخه اصلی رودخانه اوغان تشکیل شده است و در طی زمان روستا به سمت دامنه‌های شیب‌دار جنوبی و غربی بر روی ۴ پهنه لغزش قدیمی با شیب متوسط ۱۴ درصد توسعه یافته است (شکل ۱).

منطقه موردمطالعه در زون زمین‌شناسی کپه‌داغ و روی پی‌سنگ آهک‌های مارن‌دار سازند چمن‌بید و سنگ‌آهک توده‌ای مزدوران واقع شده است. متوسط بارش سالانه در ایستگاه باران‌سنجی حسین‌آباد ۶۸۰ میلی‌متر و مقدار رطوبت هوا ۷۰ درصد است. سد خاکی حسین‌آباد نیز با فاصله ۲۰۰ متری از روستا، جهت جمع‌آوری آب چشمه‌ها و تأمین آب موردنیاز منطقه، در دشت کالپوش ساخته و در سال ۱۳۹۲ آبگیری شد.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی روستای حسین‌آباد و لغزش‌های قدیمی منطقه

Fig.1. Geographical location of Hossein Abad village and old landslides in the area

۲-۲- روش انجام پژوهش

این مطالعه در چهار مرحله مختلف با جمع‌آوری، تولید، پردازش و تفسیر داده‌های تاریخی، میدانی و سنجش‌ازدور راداری انجام شده است. ابتدا برای تولید نقشه ژئومورفولوژی زمین‌لغزش قدیمی فعال شده حسین‌آباد، از داده‌های موجود همچون عکس‌های هوایی ۱:۲۰۰۰۰ سال ۱۳۴۷، تصاویر ماهواره‌ای گوگل ارث، نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ دوزین چاپ سازمان زمین‌شناسی کشور و بازدیدهای میدانی استفاده شد. همچنین برای نمایش بهتر پهنه لغزشی از تصاویر پهپاد UAV استفاده گردید و ۴۰۱ تصویر عکسبرداری شد و پس از پردازش‌های نهایی تصویر ارتوفتو پهپاد تهیه گردید و سپس نقشه نهایی، تولید و استخراج گردید.

در ادامه جهت بررسی حرکت سینماتیک زمین‌لغزش، با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری مبتنی بر پراکنش کننده‌های دائمی PSI، ۶۸ تصویر راداری سنتینل1A/B دانلود و پس از پردازش در نرم‌افزار GMTSAR، در نرم‌افزار StaMPS نقاط پراکنش کننده‌های دائمی PS استخراج شدند و نقشه‌های نرخ جابه‌جایی پهنه لغزشی تهیه گردید. پس از مشخص شدن مرز زمین‌لغزش، در چندین مرحله بازدید میدانی گسترده‌ای جهت بررسی و پرنمودن پرسشنامه‌های میزان آسیب ساختمان‌ها صورت گرفته و با ابزارهایی همچون دوربین عکسبرداری و دستگاه GNSS مستند گردید و پس از طبقه‌بندی بر اساس روش پیشنهادی پالمیسانو و همکاران (Palmisano et al., 2016)، نقشه میزان آسیب‌پذیری ساختمان‌ها در محیط گوگل ارث تهیه شد. درنهایت با تهیه نقشه میزان جابه‌جایی پهنه لغزشی و ساختمان‌ها، ارتباط مکانی تغییرات لغزش با میزان آسیب‌پذیری ساختمان‌ها و موقعیت ژئومورفولوژی آن مورد ارزیابی قرار گرفت.

۲-۳- نقشه فعالیت زمین‌لغزش قدیمی حسین‌آباد

در دهه گذشته، دانش تداخل سنجی راداری و تکنیک مبتنی بر پراکنش‌گرهای دائمی PS، به‌عنوان یک ابزار سنجش از راه دور با هدف نظارت بر اثرات حرکت زمین در مناطق مسکونی گسترش یافته است. ترکیب این داده‌ها با نتایج بررسی آسیب ساختمان‌ها، ارزیابی موفقی را از فعالیت زمین‌لغزش‌ها تضمین می‌کند (Palmisano, Vitone & Cotecchia, 2018).

فرتتی و همکاران (Ferretti, Prati & Rocca, 2001) سری زمانی PS را برای اولین بار مطرح کردند. در این روش، بخش‌هایی از ساختمان‌ها، سازه‌های فلزی، سنگ‌های روی زمین و ... که ویژگی‌های الکترومغناطیسی آن‌ها در طول زمان به‌طور محسوسی تغییر نمی‌کنند و همدوس باقی می‌مانند به‌عنوان نقاط کاندید پراکنش‌گرهای دائمی PS معرفی می‌شوند.

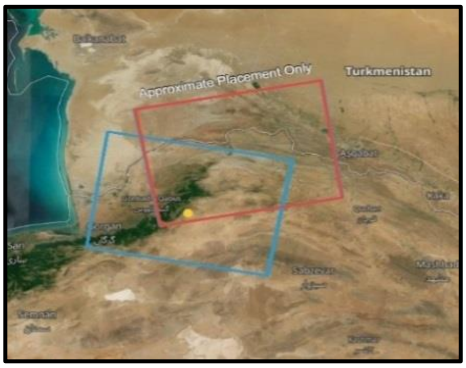
در این پژوهش با استفاده از روش StaMPS هوپر (Hooper, Segall & Zebker, 2007)، ۶۸ تصویر راداری سنتینل1A/B در دو حالت مداری گذر بالا و پایین، در بازه زمانی یکساله فعالیت لغزش حسین‌آباد مورد بررسی قرار گرفت (شکل۲) و از داده‌های تغییر شکل سری زمانی PS در محاسبه نرخ و سرعت جابه‌جایی سالانه و تجمعی استفاده شد. اطلاعات تصاویر اخذ شده از سایت آلاسکا در جدول ۱ آورده شده است. تصویر اصلی برای تهیه اینترفروگرام‌ها بر اساس کمترین مقدار خطای مبنای زمانی، مکانی و داپلر[۱] انتخاب شد و پس از پردازش‌های اولیه، ۶۷ اینترفروگرام بر اساس گراف شکل۳ برای هر دو حالت مداری تهیه و مراحل پردازش مطابق شکل ۴ انجام شد. پس از انجام پردازش‌ها، نقشه‌های جابه‌جایی حوضه موردمطالعه استخراج شدند و سپس مرز زمین‌لغزش قدیمی حسین‌آباد با نقشه جابه‌جایی مورد تطبیق قرار گرفت.

جدول ۱- ویژگی‌های تصاویر سنتینل مورداستفاده

Table 1-The characteristics of the utilized Sentinel images

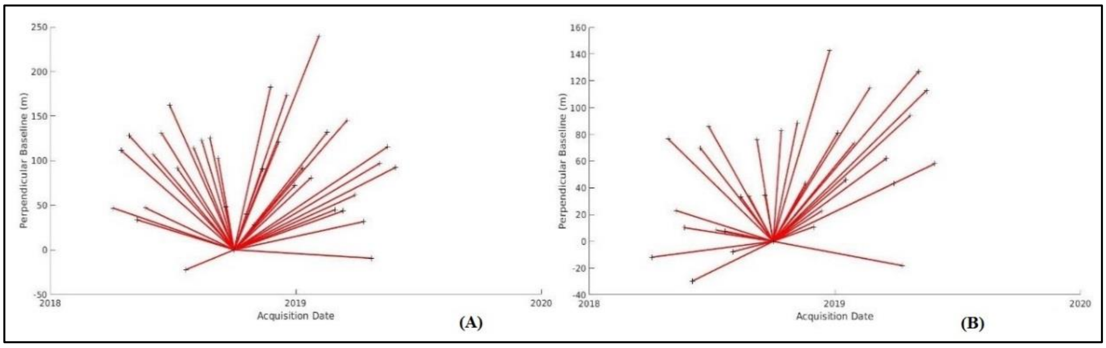
Path	Row	Acquisition Period	No.	Orbit Direction	Satelite
159	119	2018.04-2019.05	36	Ascending	1A/B
64	468	2018.04-2019.05	32	Descending	1A

[1] Doppler



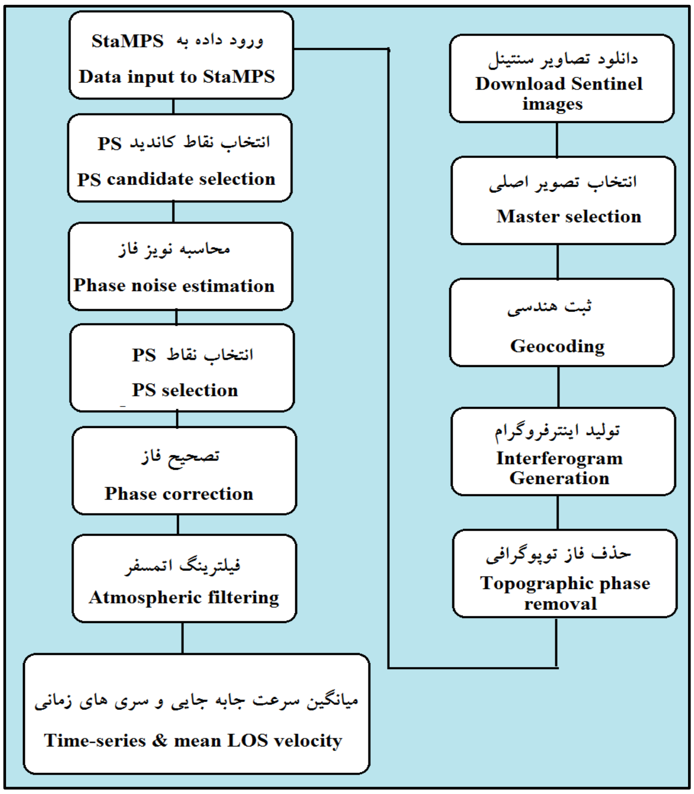
شکل۲- موقعیت تصاویر سنتینل اخذ شده در دو حالت مداری

Fig.2. The spatial location of Sentinel images acquired in two orbital configurations



شکل۳- شبکه گراف ترسیم شده برای اینترفروگرام‌های مسیرهای ۱۵۹ و ۶۴. در دو حالت (A)- مدار بالاگذر و (B)- مدار پایین‌گذر. به‌علاوه نشان‌دهنده تصاویر و خطوط ارتباطی، اینترفروگرام‌ها تولید شده بین جفت تصاویر است. محور عمودی خط مبنای عمودی تصاویر نسبت به تصویر اصلی و محور افقی زمان ثبت تصاویر است.

Fig.3. The graph network plotted for the interferograms of Pathes 159 and 64 in two configurations: (A) ascending orbit and (B) descending orbit. The figure illustrates the images, their connecting lines, and the interferograms generated between image pairs. The vertical axis represents the perpendicular baseline of the images relative to the reference image, while the horizontal axis represents the acquisition time of the images.



شکل۴- مراحل تهیه سری زمانی PS

Fig.4. The steps for generating a PS time series

۲-۴- طبقه‌بندی آسیب ساختمان

طبقه‌بندی پیشنهادی پالمیسانو و همکاران (Palmisano et al., 2016)، عمدتاً بر اساس روش EMS-98 طراحی شده است، این روش گسترده‌ترین و پرتکرارترین طبقه‌بندی آسیب در زمینه مهندسی سازه می‌باشد. بااین‌حال ازآنجایی‌که طبقه‌بندی مذکور برای آسیب‌های ناشی از زمین‌لرزه محدود شده است، نیازمند تغییرات زیادی می‌باشد. برای نیل این هدف برخی از جزئیات با روش بورلند و همکاران (Burland et al., 1978)، برای زمین‌لغزش ادغام می‌شود؛ بنابراین طبقه‌بندی پیشنهادی از ترکیب اصلی ادبیات لرزه‌ای EMS و ژئوتکنیکی بورلند و همکاران (Burland et al., 1978) به وجود آمده است. جدول۲، مقایسه این دو روش و ارائه روش پیشنهادی پالمیسانو و همکاران (Palmisano et al., 2016) را به نمایش می‌گذارد. در طبقه‌بندی پیشنهادی ۶ درجه برای آسیب از ۰-۳c به‌عنوان شدت آسیب تعریف شده است. درجه صفر و ۱ به‌عنوان ساختمان‌های قابل‌استفاده دارای خسارات جزئی، درجه ۲ نیازمند بازسازی و دارای خسارت متوسط و درجه

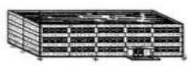
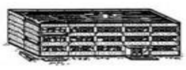
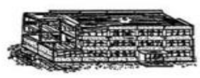
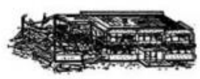
۳ به سه زیرمجموعه 3a,3b,3c به ترتیب با خسارت سنگین، خیلی سنگین و به‌طور کامل تخریب شده طبقه‌بندی گردیدند. بر اساس تنوع ساختمان‌ها، این سازه‌ها به دو نوع ساختمان با مصالح بنایی و بتنی طبقه-بندی می‌شوند. ساختمان‌هایی که با آجر، سنگ، بلوک سیمانی و یا ترکیبی از آن‌ها ساخته شده‌اند، در گروه ساختمان‌های با مصالح بنایی و ساختمان‌هایی که تیر و ستون آن‌ها از بتن ساخته شده، در گروه ساختمان بتنی قرار می‌گیرند. در جدول۳، مقدار عرض ترک‌های ساختمان برای طبقه‌بندی درجه آسیب شرح داده شده است و در جدول۴، سه سطح گسترش آسیب برای این ساختمان‌ها تعریف شده است. در سطح کم، کمتر از ۱/۳ اجزای ساختمان آسیب دیده‌اند. در سطح زیاد، بیش از ۱/۳ و کمتر از ۲/۳ از اجزای ساختمان آسیب دیده‌اند و در سطح خیلی زیاد، بیش از ۲/۳ اجزای ساختمان آسیب دیده‌اند. لذا تفاوت طبقه‌بندی پیشنهادی با دو روش دیگر در کمی بودن آن است به‌گونه‌ای که، هر درجه آسیب نه‌تنها به سطح آن، بلکه به گستردگی و فراوانی آن نیز بستگی دارد.

جهت شناسایی شاخص‌های آسیب‌پذیری، ابتدا بازدید میدانی گسترده‌ای در منطقه صورت گرفت، سپس ویژگی‌های بومی ساختمان‌ها و همچنین الگوی ترک‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت و با توجه به مطالعات الکساندر (Alexander, 1986) و پالمیسانو (Palmisano, 2011) چهار نوع شاخص انتخاب گردید. ویژگی‌های عمومی ساختمان (موقعیت و سن ساختمان، تعداد طبقات)، نوع ساختمان (مصالح بنایی و بتن)، مشخصات مصالح (جنس فونداسیون، اسکلت و سقف)، ویژگی‌های ساختاری سازه (موقعیت ترک بر روی دیوار، نوع ترک افقی، عمودی، مایل) انتخاب و فرم ارزیابی ساختمان‌ها براین اساس طراحی شد، در انتها با بازرسی‌های بصری، مستندات عکاسی و مصاحبه با صاحبان ساختمان‌ها، این فرم برای هر ساختمان پر گردید و عرض ترک ساختمان‌ها اندازه‌گیری و با دوربین عکاسی مستند گردید. در انتها با توجه به جداول ۳ و ۴ درجه خسارت برای هر ساختمان تخصیص داده شد.

جدول۲- مقایسه طبقه‌بندی پیشنهادی با دو طبقه‌بندی مشابه پالمیسانو و همکاران (Palmisano et al., 2016).

Table 2- Comparison of the proposed classification with two similar classifications by Palmisano et al., 2016

Burland, et al., (1978) Classification		EMS 98 Classification (Gruntal 1998)	Palmisano et al., (2016) Classification	
۰	ناچیز	–	–	۰	ناچیز

	Negligile					Negligible damage
			ساختمان با مصالح بنایی Masonry	ساختمان بتنی RC		
۱	بسیار کم Very Slight	۱			۱	خسارت کم Negligible to slight damage
۲ ۳	کمSlight متوسط Moderate	۲			۲	خسارت متوسط Moderate damage
۴	شدید Severe	۳			3a	خسارت سنگین Substantial to heavy damage
		۴			3b	خسارت بسیار سنگین Very heavy damage
۵	بسیار شدید Very Severe	۵			3c	تخریب شده Destruction

جدول۳- شرح اندازه‌گیری ترک‌های ساختمان در طبقه‌بندی درجه آسیب

Table 3- Description of measuring building cracks in damage degree classification

درجه خسارت **Level of damage**	**Description** توضیحات
0	بدون خسارت: عرض ترک در ساختمان بنایی کوچک‌تر و یا مساوی ۰/۱ میلی‌متر، عرض ترک در تیر و سقف، ستون و دیوارهای ساختمان بتنی کوچک‌تر یا مساوی ۰/۳ میلی‌متر No damage: crack width in masonry elements≤ 0.1 mm; crack width in R.C. beams and floors≤0.3 mm.
1	عرض ترک در ساختمان‌های با مصالح بنایی بین ۰.۱ تا ۱ میلی‌متر، عرض ترک در تیر و سقف ساختمان بتنی بین ۰.۳ تا ۱ میلی‌متر، عرض ترک در ستون و دیوارهای ساختمان بتنی بین ۰.۳ تا ۰.۵ میلی‌متر Crack width in masonry elements >0.1 mm and ≤1 mm; crack width in R.C. beams and floors> 0.3 mm and ≤1 mm; crack width in R.C. columns,wall >0.3 mm and 0.5 mm
2	عرض ترک در ساختمان با مصالح بنایی بین ۱ تا ۵ میلی‌متر، عرض ترک در ساختمان بتنی بین ۱ تا ۴ میلی‌متر، عرض ترک در ستون و دیوارهای ساختمان بتنی بین ۰.۵ تا ۲ میلی‌متر Crack width in masonry elements>1mm≤5mm; crack width in R.C. beams and floors>1mm and ≤4mm; crack width in R.C. columns, walls >0.5 mm and ≤2mm.
3	عرض ترک در ساختمان با مصالح بنایی بزرگ‌تر از ۵ میلی‌متر، عرض ترک در ساختمان بتنی بزرگ‌تر از ۴ میلی‌متر، عرض ترک در ستون و دیوارهای ساختمان بتنی بزرگ‌تر از ۲ میلی‌متر Crack width in masonry elements>5 mm; crack width in R.C. beams and floors>4 mm; crack width in R.C. columns, walls >2mm

جدول۴- شرح طبقه‌بندی پیشنهادی پالمیسانو و همکاران ((Palmisano et al., 2016

Table 4- Proposed damage classification(Palmisano et al., 2016)

درجه خسارت **Grade of damage**	شرح درجه خسارت برای ساختمان‌های با مصالح بنایی **Description of grade of damage for masonry buildings**	شرح درجه خسارت برای ساختمان‌های بتن آرمه **Description of grade of damage for R.C. building**
0	خسارت ناچیز	خسارت ناچیز

	درجه خسارت ۱–۰ (در سطح کمی از اجزا ساختمان) Negligible damage Damage of level 0 or damage of level 1 in few elements.	درجه خسارت ۱–۰ (در سطح کمی از اجزا ساختمان) Negligible damage Damage of level 0 or damage of level 1 in few elements.
1	**خسارت کم** خسارت درجه۱ در سطح زیادی از سازه‌ها یا خسارت درجه ۲ در سطح کمی از سازه‌ها، ریزش قطعات کوچک گچ یا سنگ‌های سست از طبقات فوقانی ساختمانی Slight damage Damage of level 1 in many elements or damage of level 2 in few elements, fall of small pieces of plaster only or fall of loose stones from upper parts of buildings in few cases.	**خسارت کم** خسارت درجه ۱ در سطح زیادی از سازه‌ها یا خسارت درجه۲ در سطح کمی از سازه‌ها Slight damage Damage of level 1 in many elements or damage of level 2 in few elements.
2	**خسارت متوسط** خسارت درجه۱ در سطح خیلی زیادی از سازه‌ها یا خسارت درجه ۲ در سطح زیادی از سازه‌ها، یا خسارت درجه ۳ در سطح کمی از سازه‌ها، ریزش قطعات بزرگ گچ Moderate damage Damage of level 1 in most elements or damage of level 2 in many elements or damage of level 3 in few elements, fall of fairly large pieces of plaster.	**خسارت متوسط** خسارت درجه ۱ در سطح خیلی زیادی از سازه‌ها یا خسارت درجه۲ در سطح زیادی از سازه‌ها یا خسارت درجه۳ در سطح کمی از سازه‌ها، ریزش دیوارهای گچی Moderate damage Damage of level 1 in most elements or damage of level 2 in many elements or damage of level 3 in few elements, fall of brittle cladding and plaster of wall.
3a	**خسارت سنگین** خسارت درجه ۲ در سطح خیلی زیادی از سازه یا خسارت درجه ۳ در سطح زیادی از سازه‌ها یا شکست تک تک عناصر غیرساختاری مانند دیوارهای تیغه Heavy damage Damage of level 2 in most elements or damage of level3 in many elements or failure of individual non-structural elements(Partition walls).	**خسارت سنگین** خسارت درجه۲ در سطح خیلی زیادی از سازه‌های ساختمان یا خسارت درجه۳ در سطح زیادی از سازه‌ها یا پوسته‌پوسته شدن بتن به دلیل خم‌شدگی میلگردها Heavy damage Damage of level 2 in most elements or damage of level3 in many elements or spalling of concrete cover due to buckling of reinforced bars.
3b	**خسارت بسیار سنگین** خسارت درجه۳ در سطح خیلی زیادی از سازه‌های ساختمان (شکست جدی دیوارها یا شکست ناقص طبقات و سقف‌ها) Very heavy damage Damage of level 3 in most elements or serious failure of walls or partial structural failure of roots and floors.	**خسارت بسیار سنگین** خسارت درجه۳ در سطح خیلی زیادی از سازه‌های ساختمان (ترک در بتن‌آرمه، شکست فشاری در میلگردها و تیرهای تقویت شده، یا کج شدگی ستون‌ها یا ریزش تعداد کمی از ستون‌ها یا ریزش یک طبقه فوقانی) Very heavy damage Damage of level 3 in most elements or cracks in R.C. elements with compression failure of concrete or fracture of bars or bond failure of beam reinforced bars or tilting of columns or collapse of a few columns or collapse of a few columns or collapse of a single upper floor.
3c	**تخریب شده** (نزدیک به ریزش یا کاملاً تخریب شده) Destruction Total or near total collapse.	**تخریب شده** (ریزش طبقات و اسکلت ساختمان) Destruction Collapse of floors and parts of buildings.

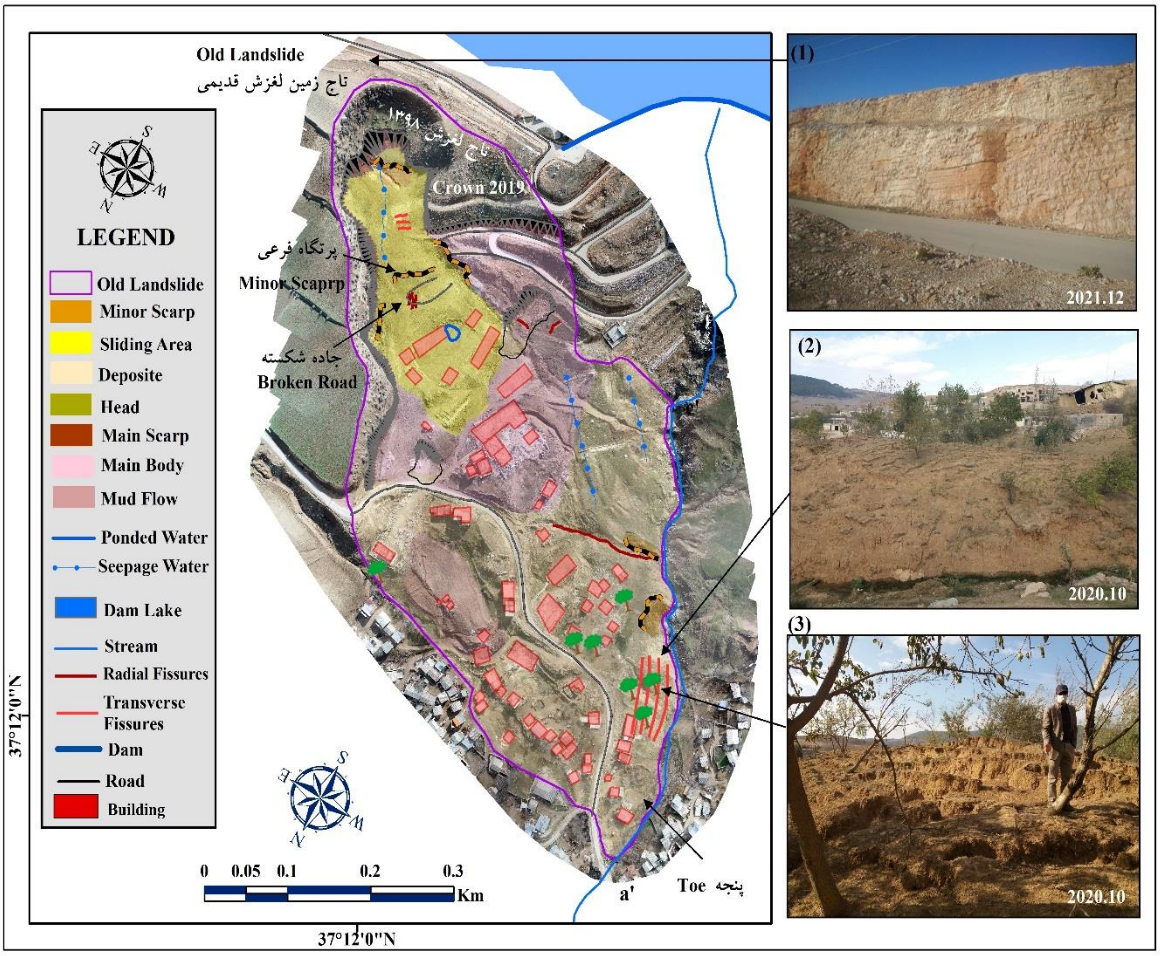
۳- بحث و نتایج

۳-۱- بررسی شرایط زمین‌شناسی و ژئومورفولوژی زمین‌لغزش حسین‌آباد

با توجه به عکس هوایی سال ۱۳۴۷، چهار زمین‌لغزش قدیمی در روستای حسین‌آباد شناسایی گردید (شکل ۱). در گذر زمان، در پی عدم شناخت این لغزش‌ها، توسعه روستا و ساخت‌وسازها بیشتر بر دامنه جنوبی روستا و بر روی دو زمین‌لغزش بزرگ قدیمی گسترش یافت. در سال ۱۳۹۲ سد خاکی حسین‌آباد با ظرفیت حدود ۱۶ میلیون مترمکعب آب، با اختلاف ارتفاع ۳۰ متر نسبت به روستا و در مجاورت دو توده لغزشی ساخته و مورد بهره‌برداری قرار گرفت (Entezam, Rezaei, Vakilzade, Mohammadi & Babazade, 2019). بارش برف و باران سنگین در اواخر سال ۱۳۹۷ این لغزش‌ها را فعال نموده و منجر به ریزش سقف خانه‌ها و خرابی بالغبر ۱۶۰ خانه می‌شود و زمین‌های دامنه لغزشی شکافته و غیرقابل استفاده می‌گردد. زمین‌لغزش اصلی حسین‌آباد با مساحت۲۲ هکتار بیشترین خسارت را در بین لغزش‌های قدیمی در منطقه ثبت نموده است و با طول ۸۷۰ متر و عرض ۴۱۹ متر به‌صورت چرخشی و مرکب فعالیت نموده است. این لغزش بر روی سنگ بستر آهک مارن دار چمن بید به وقوع پیوسته است و چندین گسل کوچک در حدفاصل دریاچه سد و پشت دیواره تاج لغزش، رخنمون دارد (تصویر ۱ در شکل ۵). با توجه به نقشه ژئومورفولوژی لغزش حسین‌آباد در شکل۵، تاج لغزش قدیمی با ارتفاع ۱۳۷۸ متر بر روی پی‌سنگ آهک تثبیت شده است و تاج لغزش جدید با ارتفاع ۱۳۶۰ متری و شیب ۴۶ درجه، در پایین‌دست آن و روی رسوبات رسی قرار گرفته است. شیب در پرتگاه اصلی لغزش ۳۰ درجه بوده و تا پنجه لغزش در نزدیکی رود به ۳ درجه می‌رسد.

بدنه اصلی لغزش و زون برداشت روی رسوبات سطحی رس و لایه‌ای از مارن در عمق ۲۵ متر واقع شده است و سطح آب زیرزمینی در منطقه برداشت به‌صورت چشمه‌هایی در سطح زمین نمایان شده است. کاربری این زون مسکونی بوده و مدرسه شبانه‌روزی، پاسگاه نیروی انتظامی، بخشداری و ساختمان‌ها بیشترین جابه‌جایی و ریزش را متحمل شده‌اند، همچنین جاده اصلی شکسته و ۱۳ متر جابه‌جا شده است. در

زون پای لغزش و محل تجمع رسوبات رسی، بیشترین ترک‌های کششی به وجود آمده است (تصویر ۲ و۳ در شکل۵) و زمین بازی، منازل و دامنه مشرف به رودخانه ناپایدار و گسیخته شده‌اند.

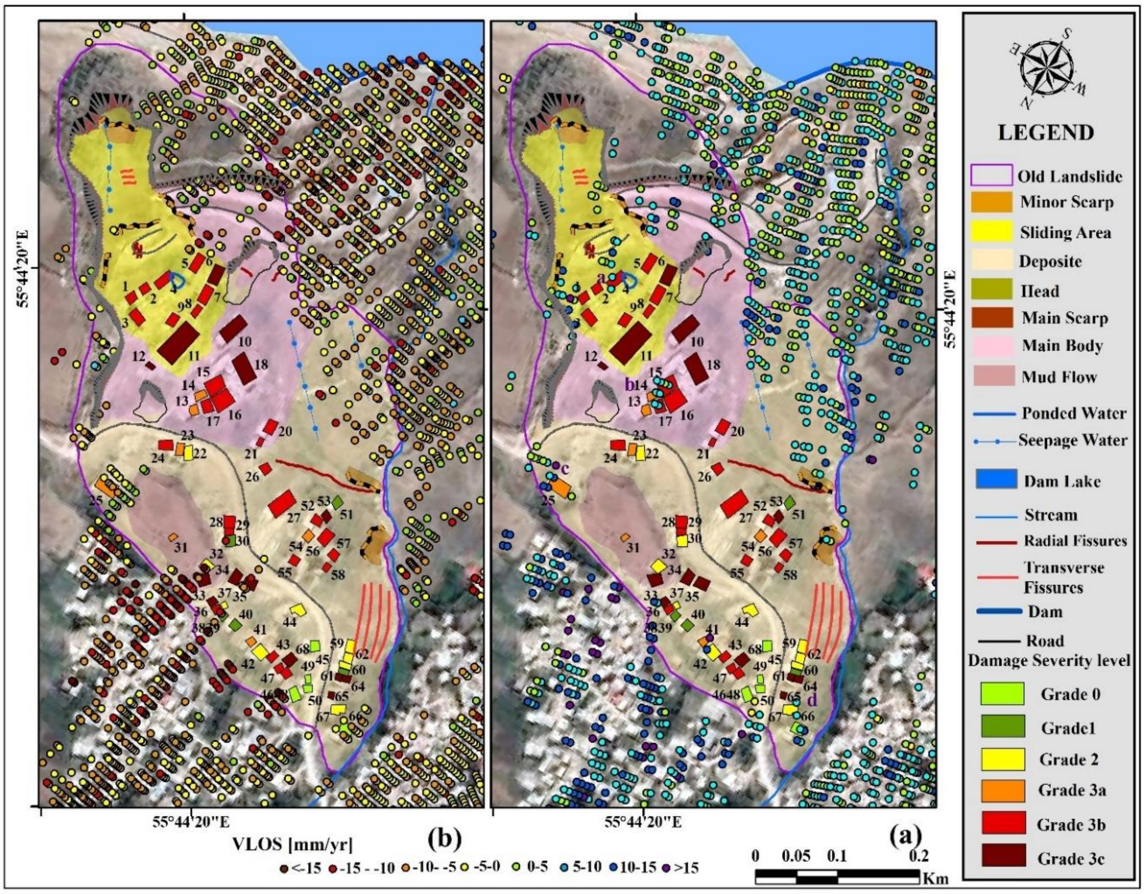


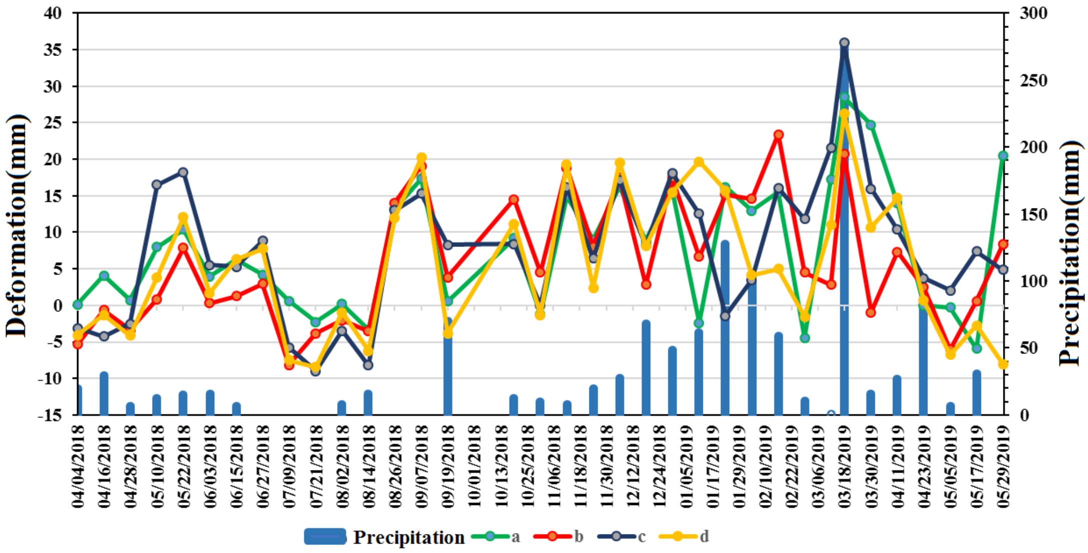
شکل ۵ - نقشه ژئومورفولوژی زمین‌لغزش حسین‌آباد و تصویر ارتوفتو پهپاد UAV در تاریخ ۱۴۰۰/۰۹/۱۸، (۱) تصویر گسل‌ها در سنگ‌آهک چمن بید، جهت دید به سمت شمال (۲) و (۳) تصاویر شکاف‌های عرضی متعدد در پای لغزش و نزدیک رود، جهت دید به سمت شرق

Fig.5. The geomorphological map of the Hossein abad landslide and the UAV orthophoto image dated 2021.12.09, including: (1) the image of faults in the Chaman Bid limestone, with a northward view direction, and (2) and (3) images of multiple transverse cracks at the toe of the landslide near the river, with an eastward view direction

۳-۲ - ارزیابی فعالیت مجدد زمین‌لغزش قدیمی حسین‌آباد

با توجه به شکل۶، موقعیت فضایی لغزش شناسایی شده از طریق پراکنش‌گرهای دائمی با مرز لغزش قدیمی مطابقت دارد که این امر فعالیت مجدد لغزش قدیمی را در سال ۲۰۱۸-۲۰۲۰ تأیید می‌کند. در نقشه جابه-جائی قائم در شکل (a)۶، سرعت جابه‌جایی بین ۱۹ میلی‌متر تا ۱۲- میلی‌متر در سال می‌باشد. همچنین در نقشه جابه‌جایی افقی در شکل (b)۶، میانگین سرعت جابه‌جایی شرقی-غربی بین سال‌های ۲۰۱۸-۲۰۲۰ بین ۱۶ تا ۲۲- میلی‌متر در سال برای این لغزش ثبت شده است و بیشترین جابه‌جایی‌های افقی با اعداد منفی در پای لغزش رخ داده است. در چهار نمودار شکل۷، بیشترین نرخ فرونشست ۳۵- میلی‌متر در پای لغزش و در زون برداشت با ۳۳- میلی‌متر در بستری از رس در ۲ ماه پربارش قابل مشاهده می‌باشد. بیشترین نرخ بالاآمدگی نیز با ۳۸ میلی‌متر در پای لغزش و بدنه اصلی می‌باشد.





شکل۷- نمودار تغییرات جابه‌جایی سری زمانی لغزش همراه با تغییرات بارش بین سال‌های ۲۰۱۸-۲۰۱۹، موقعیت نقاط مورد ارزیابی در شکل۶، تصویر (a) قابل مشاهده می‌باشند.

(داده‌های بارش از سازمان هواشناسی کل کشور دریافت گردیده است.)

Fig.7. The time-series displacement variation chart of the landslide along with precipitation changes between 2018 and 2019. The locations of the evaluated points are shown in Fig. 6, image (a).
(Precipitation data was obtained from the National Meteorological Organization.)

با استناد به نمودارهای شکل ۷، در تابستان ۱۳۹۷ روند لغزشی در پای لغزش به‌صورت فرونشست نمایان است. این تغییرات می‌تواند تحت تأثیر نوسانات دوره‌ای سطح آب دریاچه سد و آب زیرزمینی باشد که به‌صورت خروج آب از زیرزمین منازل و ترک بر روی جاده ثبت شده است. با ارزیابی هیستوگرام بارشی و با ۴۲۰ میلی‌متر بارش تجمعی در منطقه، بیشترین نرخ تغییر شکل عمدتاً در اسفندماه ۱۳۹۷ تا اردیبهشت ۱۳۹۸ در پرتگاه لغزش جدید، زون برداشت و پای لغزش مشاهده می‌شود. بر اساس یافته‌های میدانی، بیشترین حرکات افقی در زون برداشت و در جاده دسترسی به تأسیسات سد در حدود ۲۰ متر رخ داده است. بیشترین افتادگی در زون برداشت در جاده با ۳ متر افتادگی قائم و پای لغزش (تصویر ۳ در شکل۵) نمایان است و همچنین غالب بالاآمدگی‌ها و تجمع خاک نیز در بدنه اصلی و پای لغزش به سبب حرکت و تورم لایه‌ای از مارن در عمق ۲۵ متری به وقوع پیوسته و منجر به بالاآمدگی کف ساختمان‌ها و تخریب نسبی آن‌ها شده است.

در مطالعه حاضر با ارزیابی فعالیت لغزشی از نقشه ژئومورفولوژی، نقشه سرعت جابه‌جایی زمین، نمودارهای مستخرج از روش تداخل‌سنجی پراکنشگر دائمی PS و بازدیدهای میدانی مشخص می‌شود که لغزش قدیمی در سال ۱۳۹۷ فعال گردیده و با توجه به سیستم طبقه‌بندی کرودن و وارنس (Cruden & Varnes, 1996) این لغزش با سرعت آهسته در جهت شیب در طی زمان به سمت پایین حرکت نموده و چهره آن از خزش در تابستان به لغزش چرخشی در اواخر زمستان تغییر کرده است و زمین‌لغزش قدیمی حسین‌آباد تحت نفوذ بارندگی شدید و سطح اشباع آب زیرزمینی متأثر از دریاچه سد فعال گردیده است.

۳-۳- ارزیابی میزان آسیب‌پذیری ساختمان‌ها (BVA)

در بررسی‌های میدانی انجام شده، با توجه به خطر ریزش، ۶۷ ساختمان که امکان اندازه‌گیری‌های میدانی در آن‌ها وجود داشت مورد ارزیابی قرار گرفت. بر اساس داده‌های بانک اطلاعاتی مستخرج از فرم‌های ارزیابی آسیب ساختمان‌ها، ۶۰ درصد ساختمان‌ها در پهنه لغزشی حسین‌آباد، قدیمی و از جنس مصالح بنایی آجری می‌باشند. این ساختمان‌ها عمدتاً با سقف شیروانی به‌صورت همکف و یک طبقه بنا شده‌اند و با تیرها، اسکلت آهنی و فونداسیون شفته‌ای از شن و آهک بر روی پای لغزش و زون برداشت قرار دارند. ساختمان‌های جدید بتنی نیز با اسکلت و فونداسیون بتنی در پای لغزش متراکم می‌باشند.

با استناد به شکل ۷، نمودار (a) تغییرات ساختمانی همکف با مصالح بنایی در بستری از رس، در نزدیکی تاج لغزش قدیمی و در زون برداشت را به نمایش می‌گذارد که در دوره پربارش، ۳۳ میلی‌متر بالاآمدگی را تجربه کرده و پس از ۲ ماه با ۳۵ میلی‌متر کاهش ارتفاع، فرونشست پیدا کرده و دیوارهای باربر ساختمان شکسته شده است. تمامی ساختمان‌ها در زون برداشت به دلیل بالاآمدگی با خسارت بسیار سنگین مواجه شدند و تخریب گردیدند. در تصویر (a) شکل۸، ساختمان سوله ورزشی با بالاآمدگی فونداسیون، دچار شکست دیوارهای آجری باربر شده و سقف آن شکسته شده است. همچنین تمامی ساختمان‌ها در بدنه اصلی لغزش با خسارت سنگین و بیشتر از آن مواجه شدند. بالاآمدگی فونداسیون در تصویر (b) و (c) شکل۸، نشان می‌دهد که حضور آب سبب تورم مارن و رس بستر در بدنه اصلی لغزش شده است و متعاقب آن با افزایش تنش فشاری بر فونداسیون، دیوارهای اصلی، تیرها و سقف طبقات به سمت بالا حرکت نموده و شکسته

شده و پس از گذشت زمان ریزش نموده‌اند. در این ساختمان‌ها الگوی ترک‌های عمودی مرتبط با فونداسیون می‌باشند و ترک افقی دیوارها که مؤید حرکت افقی خاک می‌باشد نیز در آن‌ها مشهود است. در پای لغزش با توجه به موقعیت جغرافیایی هر سازه نسبت به توده لغزشی، هر ساختمان رفتار مقاومتی ویژه‌ای به نمایش می‌گذارد. الگوسازی ترک‌های این ساختمان‌ها، رفتار آن‌ها را توجیه می‌کند. در ساختمان‌های داخلی پای لغزش در تصاویر (d) و (e) شکل۸، خاک بستر بالاآمده و کمانش در دیوارهای اصلی قابل مشاهده است. در تصویر (f) شکل۸، در نزدیکی مرز جانبی لغزش ساختمان‌های با مصالح بنایی دارای ترک مورب پلکانی می‌باشند و در دیوارهای باربر آجری ساختمان، بر اثر نشست خاک در بستر رسی به وقوع پیوسته‌اند. در تصویر (g) شکل۸، ترک‌های مورب پلکانی و جابه‌جایی پایه بتنی ساختمان، دلالت بر نشست خاک در این منطقه دارد، این ساختمان در چندین ماه حرکت داشته و پایه‌های آن خمیده‌تر شده‌اند. ساختمان شماره ۶۵ در تصویر (h) الگوی ترک متفاوتی را نشان می‌دهد. در این ساختمان با مصالح بنایی ترک‌های عمودی زیادی وجود دارد که حتی پس از مرمت با سیمان دوباره فعال شده‌اند. همچنین ترک افقی بزرگی در دیوار بیرونی باربر و دیوار داخلی گچی آن، حادث شده است که نشان از حرکت افقی و نشست خاک بستر در پنجه لغزش دارد. باقی ساختمان‌ها در پنجه لغزش، سالم مانده و خسارت ناچیزی را تجربه کرده‌اند. نمودار d شکل ۷ و تصاویر (i و j) شکل ۸ ساختمان شماره ۶۴ را با ۳۵ میلی‌متر نشست نشان می‌دهد. این ساختمان با اسکلت و فونداسیون بتنی بر روی بخش پایینی پای لغزش واقع شده است و در اثر نشست خاک، پایه‌های بتن آرمه آن کمانش کرده و ترک‌های مورب با زاویه ۴۵ درجه بر دیوارهای آن به وجود آمده است. این نوع از ترک‌ها دلالت بر نشست فونداسیون بتنی منفرد این ساختمان دارد.

در شکل۹، نمودارهای توزیع خسارت نشان می‌دهد که ۷۰ درصد ساختمان‌ها در برابر لغزش دچار خسارت سنگین، بسیار سنگین و تخریب کامل شده‌اند و امکان مرمت و بازسازی آن‌ها وجود ندارد. با توجه به فراوانی سازه‌ها، ساختمان‌های با مصالح بنایی یک طبقه با ۸۱ درصد آسیب و سپس ساختمان‌های بتنی با ۶۰ درصد آسیب بیشترین خسارت را متحمل شده‌اند. این میزان تخریب بیشتر در زون برداشت، بدنه اصلی و داخل پای لغزش به دلیل بالاآمدگی و نشست خاک به وقوع پیوسته است و نشان از افزایش تغییرات در

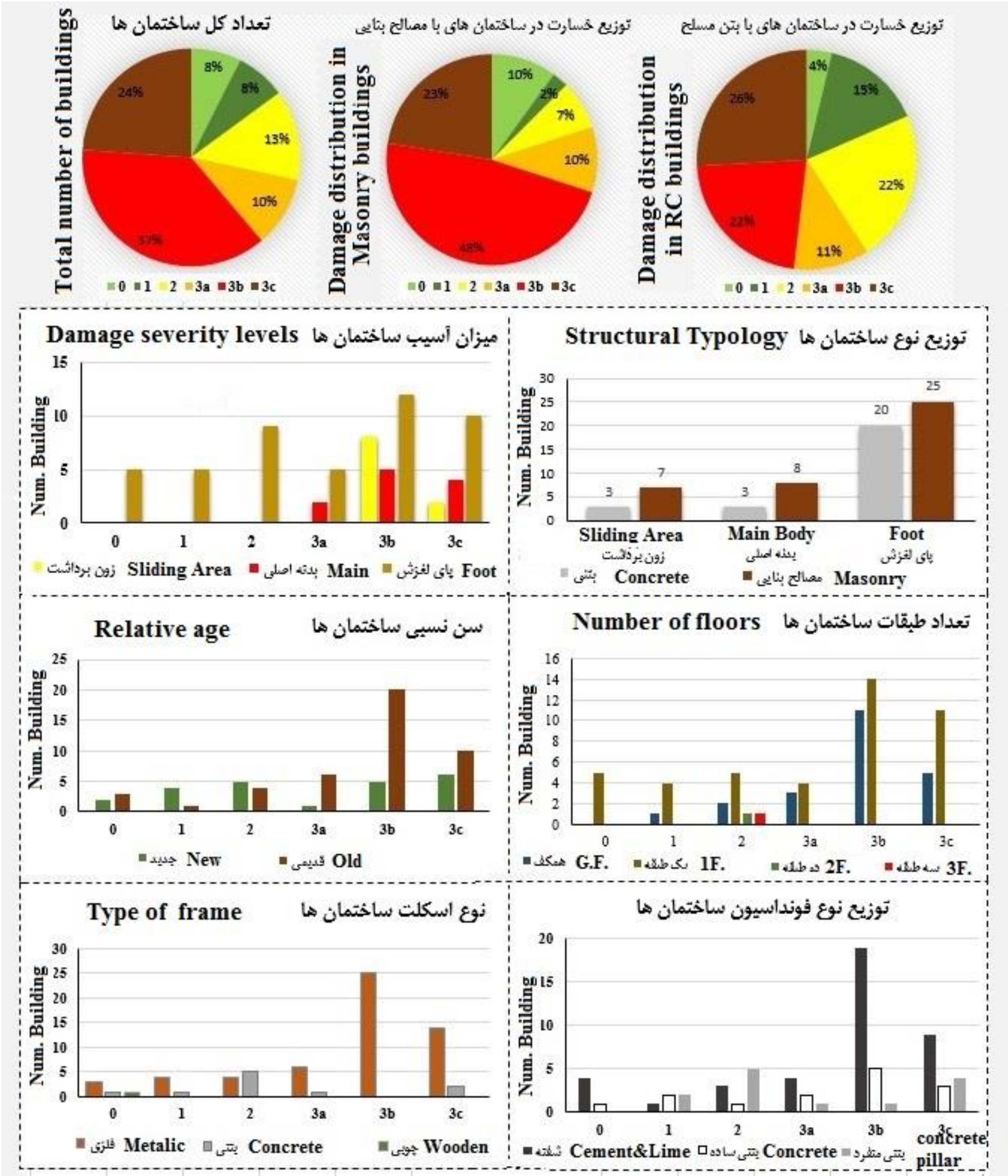
داخل توده اصلی لغزش قدیمی و حرکت مجدد آن به‌صورت لغزش چرخشی در دوره پربارش دارد. ۸ ساختمان یک طبقه، از نوع مصالح بنایی با فونداسیون شفته‌ای، در پنجه و مرز جانبی پایین پای لغزش، بر اساس نقشه حرکت افقی و قائم لغزش و مشاهدات میدانی، حرکت زیادی را ثبت نکرده‌اند و دارای خسارت ناچیز و کم می‌باشند؛ بنابراین دوری از توده اصلی لغزشی بر روی لایه مارنی عمیق در بستر زمین‌لغزش قدیمی حسین‌آباد، می‌تواند کاهش خسارت ساختمان‌ها را نشان دهد. همچنین استفاده از مصالح سبک مانند مصالح بنایی، مقاومت ساختمان‌ها را در پای لغزش تضمین می‌کند.

مقایسه نتایج به دست آمده از این پژوهش با مطالعات مشابه در دیگر نقاط جهان، مؤید کارآمدی ارتباط روش تداخل‌سنجی پراکنشگر دائمی PSI با ارزیابی آسیب‌پذیری ساختمان‌ها (BVA) در برابر لغزش را دارد. به‌طوری‌که پالمیسانو و همکاران (Palmisano et al., 2018)، با مطالعه زمین‌لغزشی در جنوب ایتالیا به این نتیجه رسیدند که اکثر ساختمان‌ها در ناحیه تاج لغزش و در مرزهای جانبی آسیب دیده‌اند و آن‌هایی که در داخل بدنه لغزش قرار دارند الگوی ترک افقی را نشان داده و آسیب کمتری دیده‌اند. همچنین نتایج مطالعات نوتتی و همکاران (Notti et al., 2015)، مشابه این پژوهش بوده و با پایش لغزشی، در منطقه مسکونی-ساحلی در جنوب شرق اسپانیا به این نتیجه رسیدند که در مرزهای جانبی و پنجه لغزش بیشترین آسیب به ساختمان‌ها وارد شده است.



شکل۸ – تصاویر آسیب به ساختمان‌های پهنه لغزشی حسین‌آباد. تصویر (a) ساختمان شماره ۱۱ با میزان خسارت 3C، تصویر (b) ساختمان شماره ۱۶ با میزان خسارت 3B، تصویر (c) ساختمان شماره ۱۸ با میزان خسارت 3C، تصویر (d) ساختمان شماره ۲۲ با میزان خسارت ۲، تصویر (e) ساختمان‌های شماره ۲۸،۲۹ و ۳۰ به ترتیب با میزان خسارت 3B،3B و۲، تصویر (f) ساختمان شماره۴۷ با میزان خسارت 3B، تصویر (g) ساختمان شماره ۶۱ با میزان خسارت 3C، تصویر (h) شماره ۶۵ با میزان خسارت۲، تصویر (i) و (j) ساختمان شماره ۶۴ با میزان خسارت 3C. پیکان قرمزرنگ نیروی فشاری، بالاآمدگی و شکست و پیکان آبی‌رنگ ترک عادی و با زاویه ۴۵ درجه.

Fig.8. Images of damage to buildings in the Hossein abad landslide area. Image (a) shows building number 11 with damage level 3C, image (b) shows building number 16 with damage level 3B, image (c) shows building number 18 with damage level 3C, image (d) shows building number 22 with damage level 2, image (e) shows buildings number 28, 29, and 30 with damage levels 3B, 3B, and 2, respectively, image (f) shows building number 47 with damage level 3B, image (g) shows building number 61 with damage level 3C, image (h) shows building number 65 with damage level 2, and images (i) and (j) show building number 64 with damage level 3C. The red arrows indicate compressive force, uplift, and fracture, while the blue arrows indicate normal cracks with a 45-degree angle.



شکل۹ - نمودارهای دایره‌ای و هیستوگرام توزیع ویژگی‌های ساختاری و جغرافیایی ساختمان‌ها و میزان آسیب آن‌ها

Fig.9. Pie charts and histograms showing the distribution of structural and geographical features of the buildings and their damage levels

۴-نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با یک رویکرد یکپارچه با بهره‌برداری از داده‌های تداخل‌سنجی پراکنشگر دائمی و الگوی آسیب ساختمان‌ها در زون‌های مختلف لغزشی به بررسی رفتار فضایی لغزش قدیمی حسین‌آباد پرداخته است. تکنیک تداخل سنجی راداری InSAR ابزاری قدرتمند برای شناسایی و نظارت بر لغزش‌های قدیمی مدفون در مناطقی که به دلیل تغییر کاربری، پوشش اراضی و سکونت، مرزهای آن مشخص نیست، می‌باشد. همچنین این داده‌ها، پشتیبان مفیدی برای ارزیابی اثرات لغزش بر سازه‌ها می‌باشند. تحلیل تغییرات ساختمان-ها و شواهد میدانی آسیب‌های ثبت شده نیز، نتایج داده‌های راداری را معتبر می‌سازد و ارزیابی خسارت ساختمان‌های موجود بر پهنه لغزش‌های قدیمی به‌عنوان شواهد غیرمستقیم فعالیت لغزش، مفید است.

نتایج این مطالعه نشان می‌دهد آسیب‌پذیری یک ساختمان در معرض لغزش را، می‌توان بر اساس نوع سینماتیک لغزش، مقاومت ساختمان و موقعیت ژئومورفولوژی اجزای لغزشی در منطقه آسیب‌دیده، ارزیابی کرد و با توجه به فعالیت مجدد لغزش قدیمی حسین‌آباد می‌توان چنین استنباط کرد که با هر بار حضور عوامل محرکی چون بارش شدید، افزایش سطح آب مخزن سد، زلزله و فعالیت‌های انسانی لغزش قدیمی حسین‌آباد فعال شده و خسارتی سنگین را برای همه ساختمان‌های بتنی و با مصالح بنایی، به بار خواهد آورد و در صورت بازسازی مجدد همواره خسارتی مشابه به وقوع خواهد پیوست و امکان اسکان در این پهنه وجود ندارد.

این روش کاربردی پیشنهادی، در قلمروی ژئومورفولوژی مهندسی قرار گرفته و می‌تواند به‌عنوان یک تکنیک سیستمی برای تسهیل اقدامات حفاظتی مناسب برای ساختمان‌های در معرض لغزش و ناپایداری معرفی - گردد. در پژوهش‌های آینده می‌توان با پایش بازه زمانی طولانی‌تر، ناپایداری لغزش قدیمی حسین‌آباد و مناطق مجاور را مورد ارزیابی قرار داد و مکانیسم فعالیت مجدد آن‌ها را بررسی نمود.

تشکر و قدردانی

این مقاله برگرفته از رساله دکتری خانم مهدیه غیور بلورفروشان به راهنمایی اول دکتر سید رضا حسین زاده، راهنمایی دوم دکتر غلامرضا لشکری پور، مشاور اول دکتر مسعود مینائی و مشاور دوم دکتر حکیمه مربی

هروی در دانشگاه فردوسی مشهد است که در ۱۰ مهر ۱۴۰۳ دفاع نهایی شده است. از حمایت‌های انجام شده تشکر و قدردانی می‌شود.

References

Afshari, A., Ghahroudi Tali, M., Sadough, H., & Ehteshami Moin abadi, M. (2020). Assessment slope instability around Lorestan railway by using differential synthetic aperture radar interferometry (DInSAR). *Quantitative Geomorphological Research*, *8*(3), 183-202. [In Persian] https://dorl.net/dor/20.1001.1.22519424.1398.8.3.11.6

Alexander, D. (1986). Landslide damage to buildings. *Environmental Geology and Water Sciences*, *8*(3), 147-151. https://doi.org/10.1007/BF02509902

Aslan, G., Foumelis, M., Raucoules, D., De Michele, M., Bernardie, S., & Cakir, Z. (2020). Landslide mapping and monitoring using persistent scatterer interferometry (PSI) technique in the French Alps. *Remote Sensing*, *12*(8), 1305. https://doi.org/10.3390/rs12081305

Burland, J. B., Broms, B. B., & De Mello, V. F. (1978). Behaviour of foundations and structures. *Paper presented at the 9th International conference on soil mechanics and foundation engineering*, 2,495-546 Tokyo, Japan: Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering.

Ciampalini, A., Bardi, F., Bianchini, S., Frodella, W., Del Ventisette, C., Moretti, S., & Casagli, N. (2014). Analysis of building deformation in landslide area using multisensor PSInSAR™ technique. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, *33*, 166-180. https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.05.011

Cruden, D. M., & Varnes, D. J. (1996). Landslide types and processes, transportation research board, U.S. National Academy of Sciences, *Special Report*, 247: 36-75.

Dykes, A. P., & Bromhead, E. N. (2018). The Vaiont landslide: re-assessment of the evidence leads to rejection of the consensus. *Landslides*, *15*(9), 1815-1832. https://doi.org/10.1007/s10346-018-0996-y

Entezam, I., Rezaei, A. R., Vakilzade, Y., Mohammadi, Y., & Babazade, N. (2019). *Evaluation and analysis of the Hosein Abad Kalpush landslide*. Report TR040, National Geoscience Database of Iran. [In Persian]

Ferlisi, S., Gullà, G., Nicodemo, G., & Peduto, D. (2019). A multi-scale methodological approach for slow-moving landslide risk mitigation in urban areas, southern Italy. *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*, *4*, 1-15. https://doi.org/10.1007/s41207-019-0110-4

Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. (2001). Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *39*(1), 8-20. https://doi.org/10.1109/36.898661

Glade, T. (2003). Vulnerability assessment in landslide risk analysis. *Erde*, *134*(2), 123-146.

Godfrey, A., Ciurean, R. L., Van Westen, C. J., Kingma, N. C., & Glade, T. (2015). Assessing vulnerability of buildings to hydro-meteorological hazards using an expert based approach–An application in Nehoiu Valley, Romania. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, *13*, 229-241. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2015.06.001

Grünthal, G. (1998). *European macroseismic scale 1998*. Luxembourg: European Seismological Commission (ESC).

Guo, C., Zhang, Y., Li, X., Ren, S., Yang, Z., Wu, R., & Jin, J. (2020). Reactivation of giant Jiangdingya ancient landslide in Zhouqu County, Gansu Province, China. *Landslides*, *17*, 179-190. https://doi.org/10.1007/s10346-019-01266-9

Hooper, A., Segall, P. & Zebker, H. (2007). Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis with application to Volcán Alcedo, Galápagos.*Journal of Geophysical Research*, 112. https://doi.org/10.1029/2006JB004763

Infante, D., Di Martire, D., Confuorto, P., Tessitore, S., Tòmas, R., Calcaterra, D., & Ramondini, M. (2019). Assessment of building behavior in slow-moving landslide-affected areas through DInSAR data and structural analysis. *Engineering Structures*, *199*, 109638. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109638

Jian, W., Wang, Z., & Yin, K. (2009). Mechanism of the Anlesi landslide in the three Gorges Reservoir, China. *Engineering Geology*, 108 (1-2), 86–95. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.06.017

Kappes, M. S., Papathoma-Koehle, M., & Keiler, M. (2012). Assessing physical vulnerability for multi-hazards using an indicator-based methodology. *Applied Geography*, *32*(2), 577-590. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2011.07.002

Khodaei Geshlag, L., Roostaei, S., Mokhtari, D., & Valizadeh Kamran, K. (2021). Application of the Interferometry Synthetic Aperture Radar (InSAR) in monitoring and evaluating landslides (case study: Ahar-Varzeghan region). *Journal of Geography and Planning*, *25*(75), 113-126. [In Persian] https://doi.org/10.22034/gp.2021.10847

Kiseleva, E., Mikhailov, V., Smolyaninova, E., Dmitriev, P., Golubev, V., Timoshkina, E., ... & Hanssen, R. (2014). PS-InSAR monitoring of landslide activity in the Black Sea coast of the Caucasus. *Procedia Technology*, *16*, 404-413. https://doi.org/10.1016/j.protcy.2014.10.106

Leone, F., Asté, J. P., & Leroi, E. (1996). Vulnerability assessment of elements exposed to mass-movement: working toward a better risk perception. *Landslides*, 1,263-270.

Li, Z., Nadim, F., Huang, H., Uzielli, M., & Lacasse, S. (2010). Quantitative vulnerability estimation for scenario-based landslide hazards. *Landslides*, *7*, 125-134. https://doi.org/10.1007/s10346-009-0190-3

Lu, P., Catani, F., Tofani, V., & Casagli, N. (2014). Quantitative hazard and risk assessment for slow-moving landslides from Persistent Scatterer Interferometry. *Landslides*, *11*, 685-696. https://doi.org/10.1007/s10346-013-0432-2

Mateos, R. M., Azañón, J. M., Roldán, F. J., Notti, D., Pérez-Peña, V., Galve, J. P., ... & Fernández-Chacón, F. (2017). The combined use of PSInSAR and UAV photogrammetry techniques for the analysis of the kinematics of a coastal landslide affecting an urban area (SE Spain). *Landslides*, *14*, 743-754. https://doi.org/10.1007/s10346-016-0723-5

Nishiguchi, T., Tsuchiya, S., & Imaizumi, F. (2017). Detection and accuracy of landslide movement by InSAR analysis using PALSAR-2 data. *Landslides*, 14, 1483-1490. https://doi.org/10.1007/s10346-017-0821-z

Notti, D., Galve, J. P., Mateos, R. M., Monserrat, O., Lamas-Fernández, F., Fernández-Chacón, F., ... & Azañón, J. M. (2015). Human-induced coastal landslide reactivation, Monitoring by PSInSAR techniques and urban damage survey (SE Spain). *Landslides*, 12, 1007-1014. https://doi.org/10.1007/s10346-015-0612-3

Palmisano, F. (2011). *Landslide structural vulnerability of masonry buildings*. PhD Thesis, Italy, Politecnico di Bari.

Palmisano, F., Vitone, C., & Cotecchia, F. (2016). Methodology for landslide damage assessment. *Procedia Engineering*, 161, 511-515. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.679

Palmisano, F., Vitone, C., & Cotecchia, F. (2018). Assessment of landslide damage to buildings at the urban scale. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, *32*(4), 04018055. https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001201

Papathoma-Köhle, M., Neuhäuser, B., Ratzinger, K., Wenzel, H., & Dominey-Howes, D. (2007). Elements at risk as a framework for assessing the vulnerability of communities to landslides. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, *7*(6), 765-779. https://doi.org/10.5194/nhess-7-765-2007

Rezapour, A., Jabari, I., & Bahrami, K. (2022). Geomorphological and geological evidences of the old landslide in Mele Kabud. *Quaternary Journal of Iran*, *8*(1, 2), 179-199. [In Persian] https://doi.org/10.22034/irqua.2022.702493

Shirani, K. (2018). Detection, monitoring and mechanism of landslide using persistent scattering ineterferometry (PSI). *Journal of Water and Soil Science*, *22*(3),213-234. [In Persian] http://dx.doi.org/10.29252/jstnar.22.3.213

Singh, A., Kanungo, D. P., & Pal, S. (2019). Physical vulnerability assessment of buildings exposed to landslides in India. *Natural Hazards*, *96*, 753-790. https://doi.org/10.1007/s11069-018-03568-y

Tang, H. M., Wasowski, J., Juang, C. H. (2019). Geohazards in the three Gorges Reservoir Area, China – Lessons learned from decades of research. *Engineering Geology*, 261, 105267. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105267

Tian, J. J., Li, T. T., Pei, X. J., Ding, F., Sun, H., Xie, X. G., & Guo, J. (2022). Formation and reactivation mechanisms of large-scale ancient landslides in the Longwu River basin in the northeast Tibetan Plateau, China. *Journal of Mountain Science*, 19(6), 1558-1575. https://doi.org/10.1007/s11629-021-7261-x

Uzielli, M., Nadim, F., Lacasse, S., & Kaynia, A. M. (2008). A conceptual framework for quantitative estimation of physical vulnerability to landslides. *Engineering Geology*, 102(3-4), 251-256. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.011

Van Westen, C. J., Van Asch, T. W., & Soeters, R. (2006). Landslide hazard and risk zonation-why is it still so difficult?. *Bulletin of Engineering geology and the Environment*, 65, 167-184. https://doi.org/10.1007/s10064-005-0023-0

Wolter, A., Stead, D., Ward, B. C., Clague, J. J., & Ghirotti, M. (2016). Engineering geomorphological characterisation of the Vajont Slide, Italy, and a new interpretation of the

chronology and evolution of the landslide. *Landslides*, 13, 1067-1081. https://doi.org/10.1007/s10346-015-0668-0

Zhang, C., Yin, Y., Dai, Z., Huang, B., Zhang, Z., Jiang, X., Tan, W., & Wang, L. (2021). Reactivation mechanism of a large-scale ancient landslide. *Landslides*, 18, 397-407. https://doi.org/10.1007/s10346-020-01538-9